

H13/B05 S式の書き換えに基づく計算体系の基礎研究(共同プロジェクト研究)

雑誌名	東北大学電気通信研究所研究活動報告
巻	9
ページ	181-183
発行年	2003-07
URL	http://hdl.handle.net/10097/30366

課題番号 H13/B05

S式の書き換えに基づく計算体系の基礎研究

[1] 組織

代表者：外山 芳人

責任者：外山 芳人

(東北大学電気通信研究所)

分担者：佐藤 雅彦 (京都大学情報学研究科)

大堀 淳 (北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科)

亀山 幸義 (筑波大学電子情報工学系)

桜井 貴文 (千葉大学理学部情報数理学科)

酒井 正彦 (名古屋大学大学院工学研究科)

鈴木 太郎 (会津大学コンピュータソフト
ウェア学科)

研究費：校費33,679円，旅費287,150円

[2] 研究経過

ソフトウェアの検証技術は、近年ますますその重要性を増している。本プロジェクトでは、プログラミング言語Lispでプログラムおよびデータの表現形式としてもちいられるS式を対象に、S式に基づく計算体系の基礎理論を確立と、プログラムの検証・変換・合成等の新しい可能性を探索することを目的として研究を行なった。

本年度は、昨年度に引き続き研究集会を開催し、研究分担者がこれまでの研究成果について情報交換するとともに、共通の問題意識のもとで新しい計算体系の可能性について検討を進めた。その結果、書き換えシステムに基づくS式の操作的意味論、環境の形式的な取り扱い、型をもつ関数型言語のコンパイラや検証技術との比較、計算体系に対応する論理体系などについての研究を発展させることができた。

第1回目の研究集会は5月20日・21日に電気通信研究所で開催された。ここでは、プロジェクトの方向付けと今年度の計画について話し合われた後、亀山(筑波大)が関数型プログラミング言語におけるリフレクションの形式的取り扱いの問題点について説明した。さらに、プログラムの自動合成に関連して、古典的な定理証明からのプログラム自動抽出が困難である理由について論じた。

ついで、外山(東北大)がS式書き換えシステム

の証明・計算系と評価システムの一体化の可能性について発表を行なった。また、佐藤(京大)はCALにおけるS式のタイプと論理の関係を中心に、概念、文脈、導出の形式化について論じた。

さらに、大堀(北陸先端大)によるパターンマッチングおよびレジスタ割り付けの論理的アプローチについての説明、桜井(千葉大)による明示的環境と明示的代入の理論の研究発表、酒井(名大)による書き換えシステムの逆関数の構成法についての提案があった。また、プログラムにおいてタイプの概念が不可欠な部分の明確化、タイプが存在しない場合の同等な機能の実現可能性、プログラムと論理における変数の役割などについて研究討論が行なわれた。

第2回目の研究集会は3月19日・20日に作並温泉で開催された。ここでは、前回の研究集会のテーマをさらに発展させる方向で研究討論が2日間にわたって行なわれた。外山(東北大)は、S式、コンビネータ項、項の三つの表現形式の関係を、論理システムとの対応に基づいて検討することを提案した。佐藤(京大)は、Zukerの結果と関連した論理システムの証明図のリダクションの停止条件を考察した。また、「証拠にもとづく真」の考え方を証明理解の観点から紹介した。桜井(千葉大)はタイプ付きシステムの強正規性の拡張について報告した。さらに、草刈(東北大)は高階書き換えシステムの観点からプログラミング言語Schemeのタイプ付けの計算モデル、青戸(東北大)は単純型付き項書き換えシステムの停止条件について発表があった。また、プロジェクトのこれまでの研究成果のまとめと今後の方向について相談し、プロジェクトの研究成果をさらに発展させるために、次年度も継続申請することを決定した。

[3] 成果

(3-1) 研究成果

(1) S式に代表される高階の書き換え系の一種であるML系の関数型言語における型システム、および、それら高階システムと低レベルコードとの関係の研究を行い、相互運用のための型システムの理論

および型理論に基づくバイトコード検証の理論を構築した。

(2) プログラム言語における文脈の概念を直接表現・操作できる計算体系の定式化について研究を行った。従来は、単純型付きラムダ計算や型なしラムダ計算の体系の拡張として定式化されていたが、2階のラムダ計算においても文脈を定式化できることを示し、合流性、強正規化可能性など主要な性質を証明した。

(3) プログラム言語のメタレベル概念を表現し、計算する機構について研究を行った。特に、shift/reset を呼ばれる、ある種のコントロールオペレータについて検討を行い、健全かつ完全な公理化を得た。この公理化を用いることによって shift/reset を持つプログラムに対する推論を行うことができるようになった。

(4) $\lambda \epsilon$ に第一級文脈(first-class context)を加えた体系 $\lambda \kappa \epsilon$ に関する研究であり、 $\lambda \kappa \epsilon$ は $\lambda \epsilon$ と同じように好ましい性質を有していることを示している。また、 $\lambda \kappa \epsilon$ では束縛変数は名前を持つので代入操作は従来の名前の α 変換による方法を用いることができず、自由変数の名前を変更するという新しい方法を与えた。

(5) 超変数の概念を持った計算系に関する研究を行なった。この計算系は、対象言語、メタ言語、メタメタ言語、... という無限個の階層から成り、ある階層の言語はそれより下の階層の言語のメタ言語となっている。そして β 基がレベルに関するある条件を満たすときには変数の衝突を避けないで代入操作を行なうことにより、レベルの低い項は対象言語の文法的な対象として扱うことができ、この仕組みを用いて文脈の概念も形式化できる。

(6) 非可換で様相を持った線型シーケント計算に項を付与し、それを明示的代入計算とみなしたときの計算系に関する研究を行なった。具体的には、その計算系と自然演繹で線型計算を表現したときの対応付けについて考察した。

(7) S式を用いたプログラミング言語の計算モデルの停止性を証明する手法を開発するために、項書き換え系の手法の拡張を試みた。その結果、それほど強力ではないものの、高階関数を持つ計算モデルの停止性の証明に適用可能な手法が得られた。

(8) 移動体プロセス計算系の一種である π 計算系の書き換えモデルによる定式化を行った。定式化のための体系として、等式付き抽象高階項書き換え系を用いた。これは、van Oostrom により提案された抽象高階項書き換え系を、等式付き書き換え系に拡張したものである。この体系を用いると、 π 計算系がもつ2種類の束縛（入力変数と局所的な名前）の両方を、ラムダ式を用いて統一的に表現することができる。

(9) “truth by evidence” の考えを導入し、命題の構成的意味論を与えた。この意味論の特徴は、命題の意味をその証明と、それが確かに証明であることを確認する方法の組として与えた。

(3-2) 波及効果と発展性など

これまでの研究成果に関する研究検討をとおして、本プロジェクトの対象であるS式に基づく計算体系の理論的枠組みに関して成果が蓄積されつつある。これらの成果は、現在プロトタイプ大規模システムの作成に広く利用されている実用言語 Lisp の理論的基礎となりうるものであり、ソフトウェア検証技術や開発支援技術の新しい可能性を開くものとして期待できる。また、本プロジェクトを通して複数の大学の研究グループの交流が飛躍的に活性化したことで、電気通信研究所を中心とした国際的な研究ネットワークの形成が今後期待できる。

[4] 成果資料

- (1) T. Nagaya and Y. Toyama, Decidability for left-linear growing term rewriting systems, *Information and Computation* Vol. 178 (2002) 499-514.
- (2) Atsushi Ohori and Kiyoshi Yamatodani An Interoperable Calculus for External Object Access. In *Proc ACM International Conference on Functional Programming (ICFP)*, pages 60-71, 2002
- (3) Tomoyuki Higuchi and Atsushi Ohori Java Bytecode as a Typed Term Calculus. In *Proc. ACM International Conference on Principles and Practice of Declarative Programming (PPDP)*, pages 201-211, 2002
- (4) M. Sato, T. Sakurai, Y. Kameyama, A Simply Typed Context Calculus with First-Class Environments *The Journal of Functional and Logic Programming*, vol. 2002, no. 4, pp. 1 -- 41, 2002

- (5) Azza A. Taha, Masahiko Sato, Yuki Yoshi Kameyama, "A Second Order Context Calculus", Computer Software, Vol. 19, No. 3, pp. 2-19, 2002
- (6) 堀江美保子, 酒井正彦, 坂部俊樹: オブジェクト指向計算モデルにおける例外処理機能の型付, コンピュータソフトウェア, Vol.20, No.2, pp.54--58(2003,3).
- (7) Masahiko Sakai, Keiichirou Kusakari: On Proving Termination of Higher-Order Rewrite Systems by Dependency Pair technique, The First International Workshop on Higher-Order Rewriting (HOR'02), Copenhagen, Denmark, July 21, p.25(2002,7).
- (8) Hideto Kasuya, Masahiko Sakai, Kiyoshi Agusa: Descendants and Head Normalization of Higher-Order Rewrite Systems, 6th International Symposium on Functional and Logic Programming at Aizu Japan September 15-17 (FLOPS 2002), LNCS 2441, Springer, pp.198--211(2002,9).
- (9) 西田直樹, 酒井正彦, 坂部俊樹: 右辺のみに現われる変数を持つ項書換え系のナローイングに基づく実行的書き換えとその停止性, 電子情報通信学会技術報告, Vol.COMP2002-68, pp.45--52(2003,1).